

**ANALISA PERMEABILITAS MATERIAL STATOR PADA PEMODELAN  
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR 12 SLOT 8 POLE  
MENGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I  
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

**Oleh:**

**MUHAMAD IBNU YASYAK**

**D400170137**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA  
2021**

**HALAMAN PERSETUJUAN**

**ANALISA PERMEABILITAS MATERIAL STATOR PADA PEMODELAN  
*PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR 12 SLOT 8 POLE*  
MENGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD***

**PUBLIKASI ILMIAH**

oleh:

**MUHAMAD IBNU YASYAK**

**D400170137**

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



**Agus Supardi, S.T., M.T.**

**NIK. 883**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**ANALISA PERMEABILITAS MATERIAL STATOR PADA PEMODELAN  
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR 12 SLOT 8 POLE  
MENGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD**

**OLEH**


**MUHAMAD IBNU YASYAK**

**D400170137**

**Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Pada hari Jumat, 2 Juli 2021  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat**

**Dewan Penguji:**

- 1. Agus Supardi, S.T., M.T.  
(Ketua Dewan Penguji)**
- 2. Umar, S.T., M.T.  
(Anggota I Dewan Penguji)**
- 3. Aris Budiman, S.T., M.T.  
(Anggota II Dewan Penguji)**



**Dekan,**



**Sunarjono, M.T., Ph.D.**

**NIK. 628**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 2 Juli 2021

Penulis



**MUHAMAD IBNU YASYAK**

**D400170137**

# **ANALISA PERMEABILITAS MATERIAL STATOR PADA PEMODELAN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR 12 SLOT 8 POLE MENGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD**

## **Abstrak**

Generator merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Salah satu generator yang di pakai dalam pemanfaatan energi baru terbarukan khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Mikro adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Generator ini memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. Perlu sebuah rancangan model atau desain PMSG untuk memaksimalkan fluks magnet dan medan magnet yang ditimbulkan, jenis bahan material penyusun stator pada generator merupakan salah satu dari berbagai aspek penting dalam pembuatan rancangan model atau desain PMSG. Jenis bahan material ini terkait dengan suatu permeabilitas, yaitu ukuran kemampuan sebuah material untuk menunjang terbentuknya medan magnet dalam material tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan membuat desain seperempat model PMSG 12 slot 8 pole dengan menggunakan *software MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Pengujian dilakukan dengan variasi bahan material stator dengan material meliputi *TR52 USS transformer 52-29 gage, carpenter silicon steel, remko soft pure iron, AISI silicon steel M47-26 gage, ASTM silicon steel 64F-320*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai permeabilitas tertinggi 0,00004 Wb/Am pada bahan material *remko soft pure iron*, sedangkan untuk nilai konstanta *back EMF* tertinggi 0,175499505 Vs/rad pada bahan material *AISI silicon steel M47-26 gage*. Hasil data perbandingan bahan material stator tersebut menunjukkan bahwa nilai permeabilitas bahan besi murni lebih baik daripada campuran baja dan *silicon*, sedangkan untuk nilai konstanta *back EMF* bahan campuran baja dan *silicon* lebih baik daripada besi murni.

**Kata Kunci :** *Finite Elemen Method, MagNet Infolytica, Permanent Magnet Synchronous Generator, Stator.*

## **Abstract**

Generator is a tool that functions to convert mechanical energy into electrical energy. One of the generators used in the utilization of new and renewable energy, especially in Micro Scale Bayu Power Plants, is the Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). This generator has the same working principle as a synchronous generator but in the rotor the field coils are replaced with permanent magnets. It is necessary to design a PMSG model or design to maximize the magnetic flux and magnetic field generated, the type of material that makes up the stator in the generator is one of the various important aspects in making the design of the PMSG model or design. This type of material is related to a permeability, which is a measure of the ability of a material to support the formation of a magnetic field in the material. This research was conducted by designing a quarter of the PMSG 12 slot 8 pole model using the Finite Element Method (FEM) based MagNet Infolytica 7.5 software. Tests were carried out with a variety of stator materials with materials including TR52 USS transformer 52-29 gage, carpenter silicon steel, remko soft pure iron, AISI silicon steel M47-26 gage, ASTM silicon steel 64F-320. The results showed that the highest permeability value was 0,00004 Wb/Am for remko soft pure iron, while the highest back EMF constant value is 0.175499505 Vs/rad for AISI silicon steel M47-26 gage. The results of the comparison data for the stator material show that the permeability

value of pure iron is better than a mixture of steel and silicon, while for the value of the back EMF constant, the mixture of steel and silicon is better than pure iron.

**Keywords:** *Finite Elemen Method, MagNet Infolytica, Permanent Magnet Synchronous Generator, Stator.*

## 1. PENDAHULUAN

Revolusi industri saat ini berkaitan dengan kebutuhan teknologi yang semakin tumbuh dan berkembang pesat. Perkembangan ini berpengaruh terhadap banyak bidang, meliputi teknologi dan industri terutama pada sektor energi baru terbarukan. Pada sektor industri banyak bergantung pada sumber daya alam tak terbarukan, seperti batu bara dan minyak bumi yang dijadikan sebagai sumber energi. Untuk itu, perlu perubahan secara perlahan untuk beralih ke sumber energi baru dan terbarukan sebagai solusi terbaik. Salah satu energi terbarukan berpotensi untuk meningkatkan sektor teknologi dan industri adalah energi angin. Energi angin merupakan energi yang telah berkembang pesat selama dua dekade terakhir dan menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan serta layak secara ekonomi (Liu et al, 2017).

Salah satu pemanfaatan energi baru terbarukan angin saat ini adalah mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Mikro (PLTBSM) yang memaksimalkan turbin angin sebagai komponen utama pada pembangkit. Kerja turbin angin berdasarkan energi yang ditimbulkan oleh kecepatan angin untuk memutar bilah atau kipas. Putaran tersebut dikonversi menjadi energi mekanik, kemudian oleh generator dikonversi menjadi energi listrik. Pada kontrol turbin angin disini memainkan peran kunci dalam aplikasi energi angin, memastikan efisiensi dan efektivitas biaya yang tinggi (Menezes et al, 2018).

Pada PLTBSM menggunakan generator listrik sebagai komponen yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Generator yang digunakan berupa *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Pada generator ini memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. PMSG dapat mengontrol ekstraksi daya maksimum untuk sistem konversi energi angin skala kecil dengan menyesuaikan kecepatan putar turbin angin (Putri et al, 2017)

Pada pemodelan PMSG ini salah satu komponen penting adalah komponen stator di generator sinkron magnet permanen. Pada stator *slotless* mempertimbangkan celah udara magnet dan mekanis menggunakan metode analisis semi tiga dimensi 3D atau berbasis *Finite Elemen Method* (Koo et al, 2015).

Untuk memaksimalkan fluks magnetik dan medan magnet yang ditimbulkan pada PMSG perlu memperhatikan permeabilitas material penyusun stator pada generator. Permeabilitas

merupakan ukuran sejauh mana suatu bahan dalam menunjukkan hubungan antara kerapatan medan magnet dengan intensitas Medan magnet (Herres, 2015).

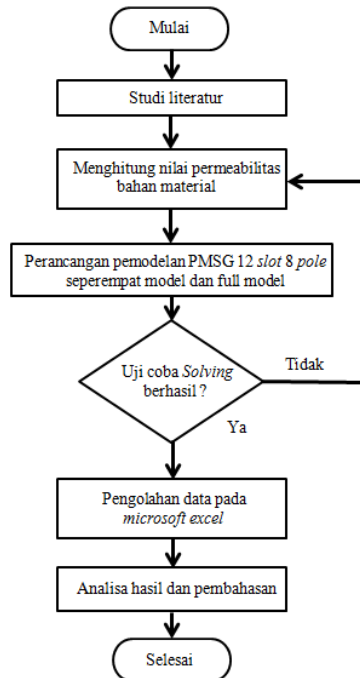
Penelitian ini menggunakan PMSG 12 *slot* 8 *pole* dengan tujuan untuk mencari perbandingan nilai permeabilitas bahan melalui analisa kurva B-H dan bahan tersebut nantinya digunakan sebagai material stator pada desain seperempat model PMSG 12 *slot* 8 *pole*.

Tahap selanjutnya menganalisa nilai *flux linkage* dari proses *solving* seperempat model PMSG 12 *slot* 8 *pole* dengan menggunakan *software MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Metode FEM merupakan metode yang efektif dalam menghitung distribusi sebuah medan elektromagnetik. Metode ini dapat menunjukkan analisa distribusi fluks magnet dan memiliki kelebihan dalam menghitung beberapa parameter meliputi torsi *cogging*, dan nilai induktansi. Pada penelitian ini penulis berfokus pada pengaruh bahan material stator terhadap pola fluks atau tepatnya nilai *flux linkage* dari kumparan (koil) generator. *Flux linkage* merupakan fluks magnet yang dihasilkan dari masing-masing fasa sebuah kumparan (koil) generator yang mempengaruhi nilai *back EMF* (*Electromotive Force*) atau gaya gerak listrik (GGL) yang diakibatkan oleh induksi magnet. Nantinya data yang diperoleh kemudian dianalisa agar kedepannya diharapkan dapat berguna dalam proses perkembangan perancangan model generator.

## **2. METODE**

### **2.1 Rancangan Penelitian**

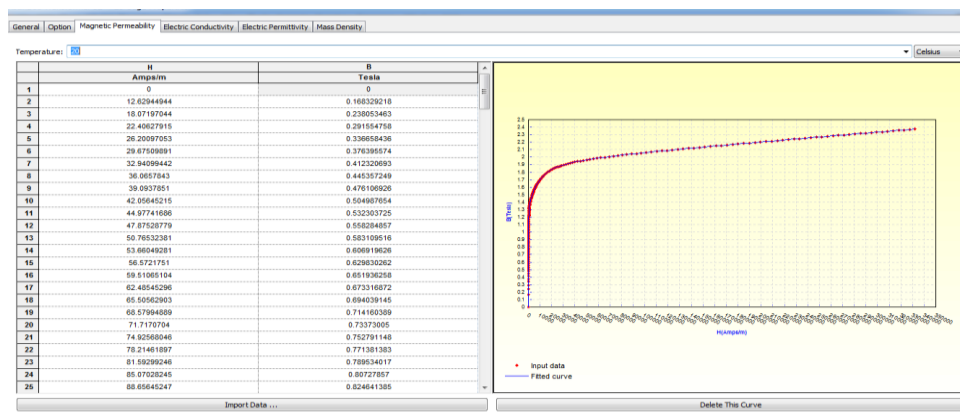
Pada rancangan penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang digunakan penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir, tahapan-tahapan tersebut ditampilkan pada *flowchart* berikut.



Gambar 1. *Flowchart* tahapan penelitian

## 2.2 Permeabilitas Bahan Material

Pada perhitungan nilai permeabilitas ini dilakukan dengan menganalisa kurva B-H yang dihasilkan dari *software MagNet Infolytica 7.5*. Permeabilitas adalah ukuran kemampuan sebuah material untuk menunjang terbentuknya medan magnet dalam material atau derajat magnetisasi sebuah material dalam merespon terhadap suatu medan magnet. Berikut adalah tampilan kurva B-H dan nilai B-H suatu bahan material pada *software MagNet Infolytica 7.5*.



Gambar 2. Tampilan kurva B-H dan nilai B-H pada *software MagNet Infolytica 7.5*

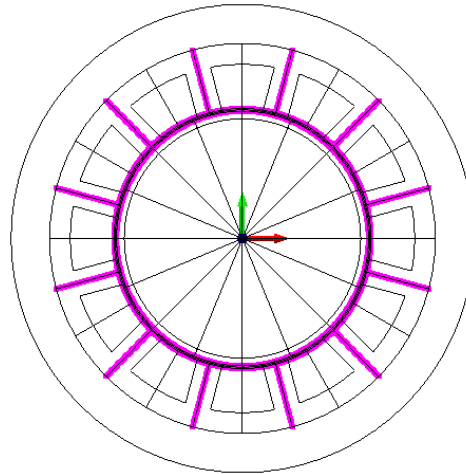
Gambar 2 merupakan tampilan kurva B-H bahan material yang nantinya dilakukan perbandingan nilai permeabilitas dari beberapa bahan material yang sudah ditentukan.

## 2.3 Rancangan Generator

Perancangan sebuah generator dilaksanakan dengan memperhitungkan penyusunan beberapa komponen yaitu meliputi stator, rotor, magnet dan lainnya. Pada perancangan model *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* 12 slot 8 pole ini nantinya menggunakan *software*



*MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Berikut gambar rancangan model PMSG 12 slot 8 pole dalam bentuk sketsa *frame*.



Gambar 3. Rancangan model PMSG 12 slot 8 pole dalam bentuk sketsa *frame*

Gambar 3 merupakan perancangan model *Permanent Magnet Synchronous Generator* 12 slot 8 pole dengan *software MagNet Infolytica 7.5* dalam bentuk sketsa *frame*. Perancangan ini menggunakan parameter ukuran komponen yang tercantum pada tabel berikut.

Tabel 1. Parameter ukuran awal perancangan PMSG

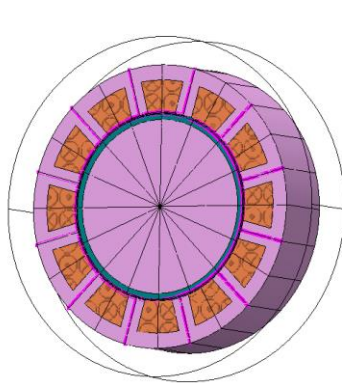
Variabel	Nilai (mm)
Diameter rotor	92
Diameter dalam magnet	92
Diameter luar magnet	98
Ketebalan magnet	3
Lebar celah udara	2
Diameter lubang slot	134
Diameter dalam stator	100
Diameter luar stator	150

Perancangan model PMSG 12 slot 8 pole pada *software MagNet Infolytica 7.5* menggunakan variasi 5 jenis bahan material stator. Jenis bahan material tersebut meliputi TR 52 : USS Transformer 52—29 gage, Carpenter : silicon steel, Remko : Soft pure iron, AISI silicon steel M-47 26 Ga dan ASTM Silicon Steel 64F 320. Untuk komponen selain stator bahan material tetap tanpa variasi seperti yang tercantum dalam tabel 2.

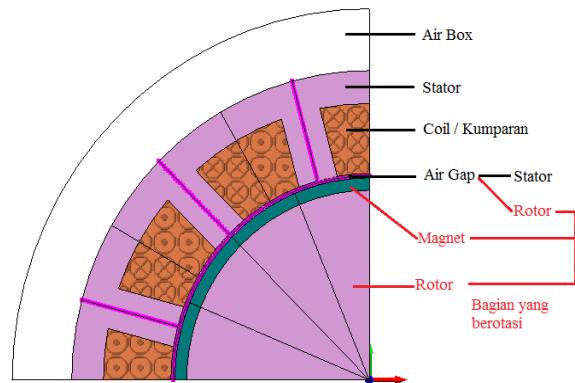
Tabel 2. Jenis bahan material komponen

Komponen	Material
Rotor	TR52: USS Transformer 52--29 Gage
Koil	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
Magnet	PM12: Br 1.2 mur 1.0
Airbox	AIR

Hasil Perancangan model *PMSG 12 slot 8 pole* pada *software MagNet Infolytica 7.5* yang disesuaikan menggunakan data pada tabel 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Full Model PMSG 12 slot 8 pole



Gambar 5. Komponen Utama PMSG

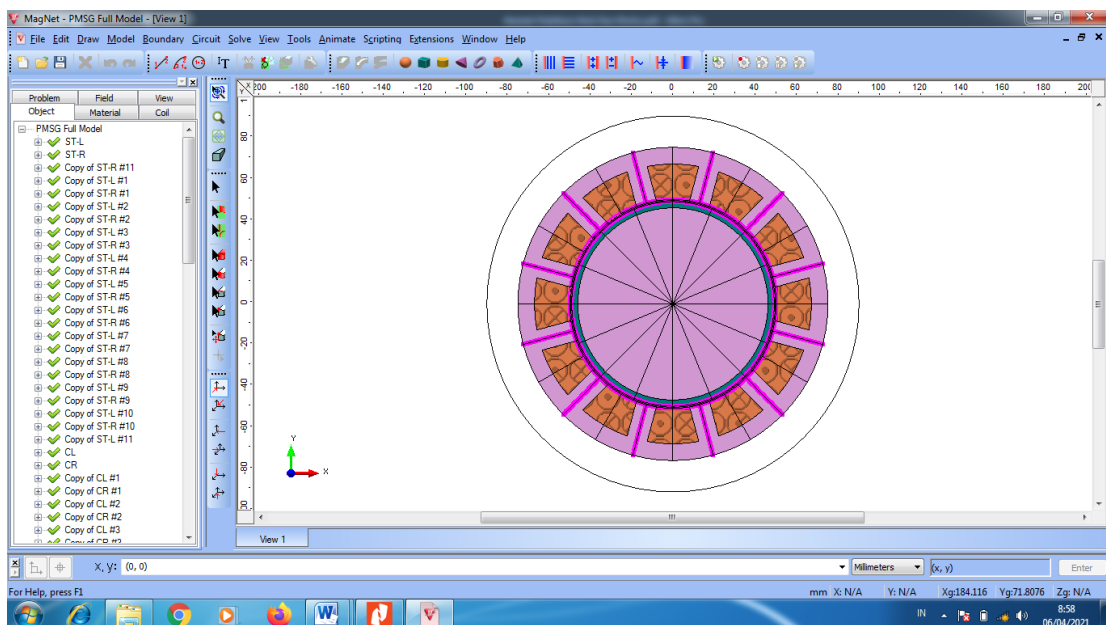
Gambar 4 merupakan hasil perancangan model *PMSG 12 slot 8 pole* pada *software MagNet Infolytica 7.5*. Perancangan generator ini dapat dibuat dengan desain full model atau 1/4 model saja, karena pada desain generator ini model akan berulang setiap 90° sehingga dengan simulasi menggunakan *software MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method* ini desain 1/4 model ataupun full model sama saja. Gambar 5 merupakan bagian-bagian atau komponen yang terdapat pada model *PMSG 12 slot 8 pole* meliputi *air box*, stator, *coil/kumpanan*, *air gap*, magnet, dan rotor. Perancangan generator ini akan dilakukan dengan desain 1/4 model agar tampilan gelombang tegangan, pola fluks, dan nilai *flux linkage* pada *software* lebih ringkas dan efisien. Pada rancangan ini juga dilakukan uji simulasi menggunakan variasi bahan material pada stator dengan lilitan koil pada masing-masing slot stator. Berikut tabel mengenai uji simulasi generator yang akan dibuat.

Tabel 3. Jumlah lilitan koil tiap slot pada masing-masing material

Material Stator	Jumlah lilitan
<i>TR52: USS Transformer 52--29 Gage</i>	10
<i>Carpenter: Silicon steel</i>	10
<i>Remko: Soft pure iron</i>	10
<i>AISI silicon steel M-47 26 Ga</i>	10
<i>ASTM Silicon Steel 64F 320</i>	10

## 2.4 Software MagNet Infolytica 7.5

*Software MagNet Infolytica* memiliki fasilitas tampilan dan fitur yang bisa digunakan dalam membuat perancangan sebuah model generator. *Software* ini berupa media laboratorium virtual yang bahan material penyusun inti besi, lilitan, dan magnetik nya dapat divariasi sesuai kebutuhan. Berikut merupakan gambar tampilan model *Permanent Magnet Synchronous Generator 12 slot 8 pole* pada *software MagNet Infolytica 7.5*

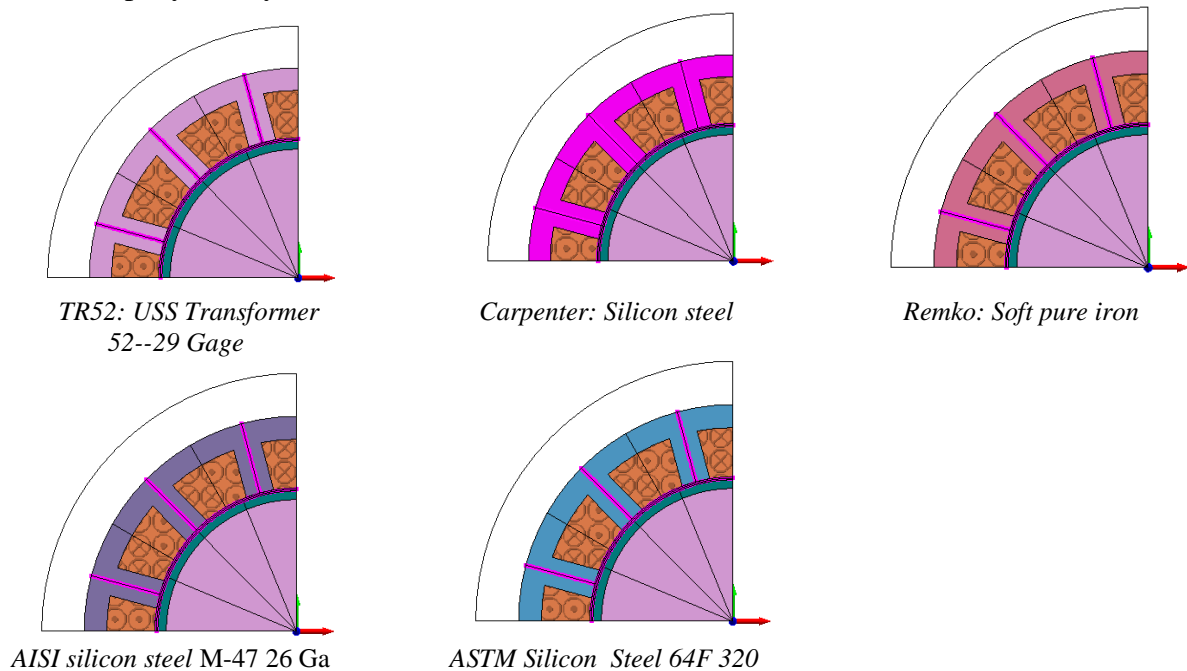


Gambar 6. Tampilan utama generator full model pada *software MagNet Infolytica 7.5*

Gambar 6 merupakan tampilan utama *software MagNet Infolytica 7.5*. *Software* ini dirancang sebagai perangkat lunak pemodelan dalam bentuk dua dimensi dan tiga dimensi serta dalam pemecahan masalah elektromagnetik. Alat atau komponen yang dapat dibuat dan disimulasikan dalam *software MagNet Infolytica* ini meliputi generator atau motor, transformator dan beberapa peralatan lain yang menggunakan kumparan atau magnet permanen.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pembahasan ini penulis merancang pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator* 12 slot 8 pole dengan bentuk seperempat model menggunakan *software MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method*. Pada pengujian ini komponen stator dilakukan variasi bahan material penyusunnya.

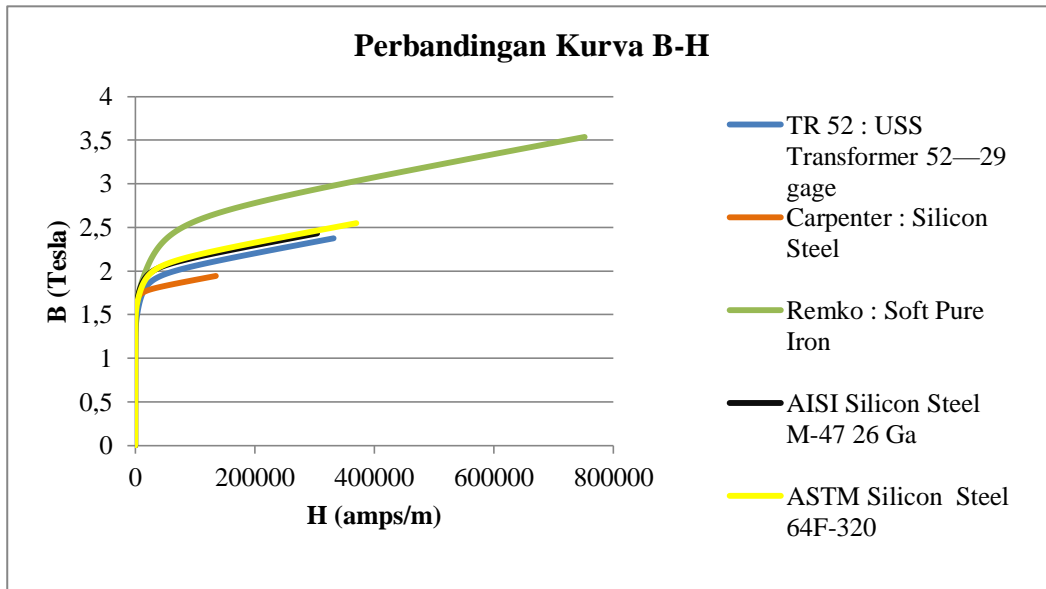


Gambar 7. Perbandingan material stator

Pada gambar 7 menunjukkan konstruksi sebuah stator dari masing-masing bahan material pada seperempat model *Permanent Magnet Synchronous Generator* 12 slot 8 pole.

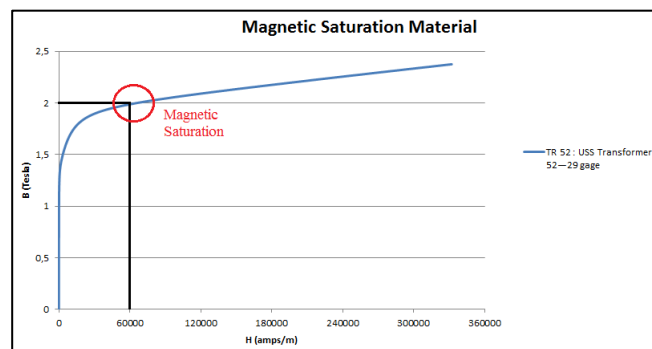
#### 3.1 Permeabilitas Bahan Material

Hasil perhitungan nilai permeabilitas dari masing-masing bahan material dilakukan dengan menganalisa kurva B-H yang dihasilkan dari *software MagNet Infolytica 7.5*.



Gambar 8. Kurva B-H bahan material

Gambar 8 menunjukkan hasil perbandingan kurva B-H dari masing-masing bahan material. Pada kurva tersebut menggambarkan perbandingan nilai B (rapat fluks) dan H (intensitas medan magnet). Nilai rapat fluks B sebagai rapat sebuah medan magnet yang melewati area sebuah material. Intensitas medan magnet H sebagai perubahan yang dihasilkan karena interaksi B dengan materi yang dihadapinya. Kurva tersebut diperoleh dari data *magnetic permeability* pada *software MagNet Infolytica* yang dikonversi ke *microsoft excel*. Nilai permeabilitas didapatkan dengan menemukan titik saturasi dari sebuah kurva B-H. Berikut merupakan titik saturasi pada salah satu bahan material dengan variabel pembanding nilai H (intensitas medan magnet) sebesar 60.000 Amp/m dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. *Magnetic saturation material*

Pada gambar 9 menunjukkan nilai titik saturasi (*magnetic saturation*) pada bahan material TR52: USS Transformer 52--29 Gage dengan variabel pembanding nilai H sebesar 60.000 Amp/m didapatkan nilai B sebesar 2 tesla. Proses pencarian nilai titik saturasi pada bahan material yang lain juga sama dengan variabel pembanding nilai H sebesar 60.000 Amp/m. Berikut didapatkan nilai titik saturasi B dan H pada masing-masing bahan material tercantum pada tabel 4.

Tabel 4. Nilai titik saturasi B dan H pada bahan material

Material Stator	B (Tesla)	H (Amp/m)	Massa Jenis (Kg/m <sup>3</sup> )
<i>TR52: USS Transformer 52--29 Gage</i>	2	60000	7600
<i>Carpenter: Silicon steel</i>	1,82	60000	7600
<i>Remko: Soft pure iron</i>	2,4	60000	7880
<i>AISI Silicon Steel M-47 26 Ga</i>	2,1	60000	7750
<i>ASTM Silicon Steel 64F 320</i>	2,1	60000	7700

Pada tabel 4 menunjukkan hasil nilai saturasi dari titik nilai B (rapat fluks) yang didapat dari kurva B-H masing-masing bahan material dengan variabel pembanding nilai H sebesar 60.000 Amp/m. Nilai massa jenis bahan didapat dari data yang tercantum di spesifikasi bahan material pada *software MagNet Infolytica*. Perhitungan nilai permeabilitas bahan material dilakukan dengan menggunakan rumus persamaan sebagai berikut.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1)$$

Keterangan :

$\mu$  : Permeabilitas atau daya hantar magnet (Wb/Am)

B : Kerapatan fluks magnet (T)

H : Kuat atau intensitas medan magnet (A/m)

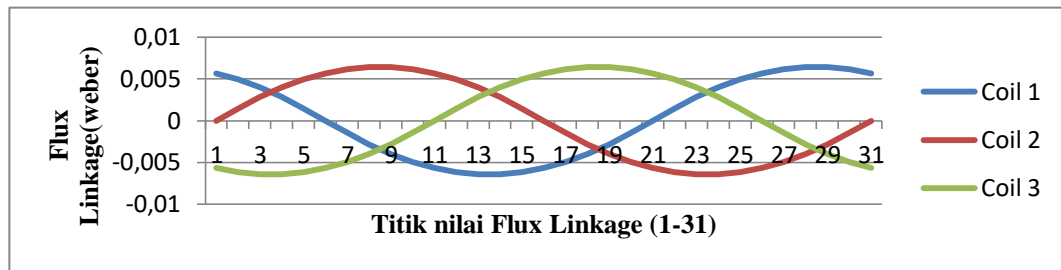
Berikut merupakan perhitungan nilai permeabilitas bahan material dari beberapa variasi bahan material stator yang telah ditentukan

- $\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{60000} = 0,0000333 \text{ Wb/Am}$  (*TR52: USS Transformer 52--29 Gage*)
- $\mu = \frac{B}{H} = \frac{1,82}{60000} = 0,0000303 \text{ Wb/Am}$  (*Carpenter: Silicon Steel*)
- $\mu = \frac{B}{H} = \frac{2,4}{60000} = 0,00004 \text{ Wb/Am}$  (*Remko: Soft pure iron*)
- $\mu = \frac{B}{H} = \frac{2,1}{60000} = 0,000035 \text{ Wb/Am}$  (*AISI silicon steel M-47 26 Ga*)
- $\mu = \frac{B}{H} = \frac{2,1}{60000} = 0,000035 \text{ Wb/Am}$  (*ASTM Silicon Steel 64F 320*)

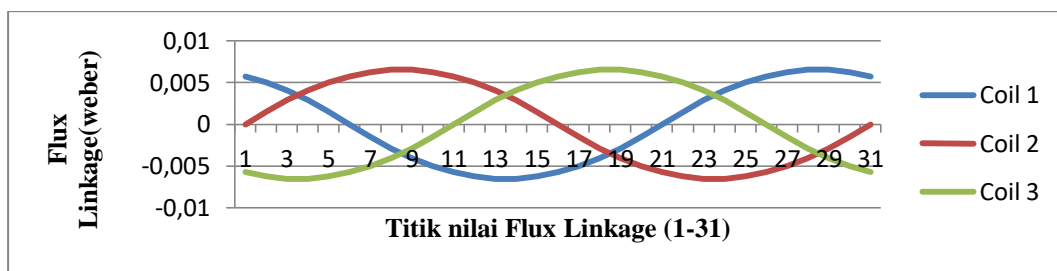
### 3.2 Hasil Solving Flux Linkage

Hasil *solving* berupa nilai *flux linkage* didapatkan setelah konstruksi seperempat model *Permanent Magnet Synchronous Generator 12 slot 8 pole* selesai dibuat dan perhitungan nilai permeabilitas dari masing-masing bahan material selesai yang kemudian dilakukan proses *solving* menggunakan *software MagNet Infolytica 7.5* berbasis *Finite Element Method*. Pada hasil *flux linkage* menunjukkan gambar gelombang dari masing-masing *coil* / kumparan. *Permanent Magnet Synchronous Generator 12 slot 8 pole* dengan model 90° ini dilakukan

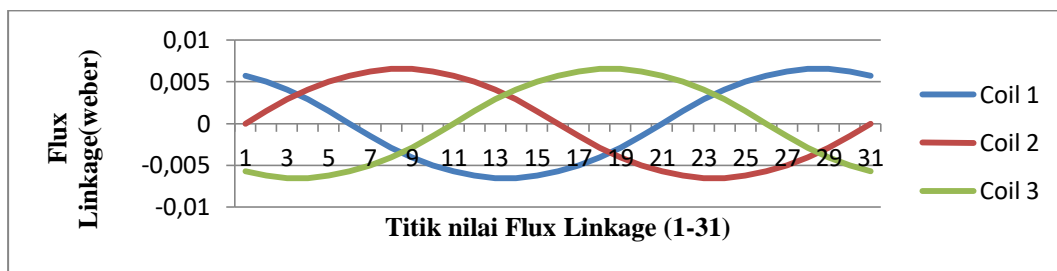
pengambilan data nilai *flux linkage* tiap 3° sudut rotasinya. Nilai *flux linkage* tiap 3° sudut rotasi tersebut berjumlah 31 titik dan memiliki nilai *flux linkage* yang digambarkan dengan grafik.



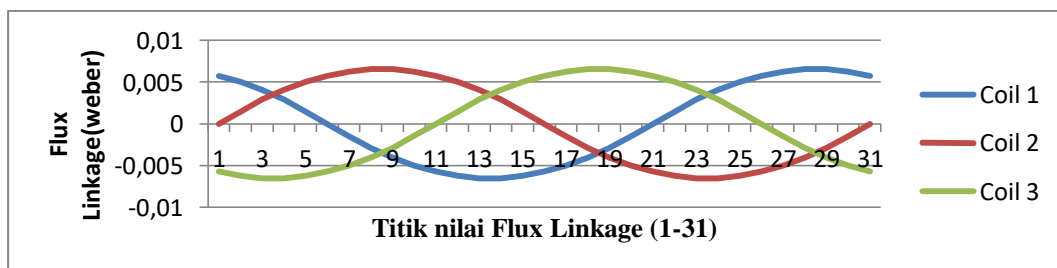
Gambar 10. *Flux linkage* dengan material stator TR52: USS Transformer 52--29 Gage



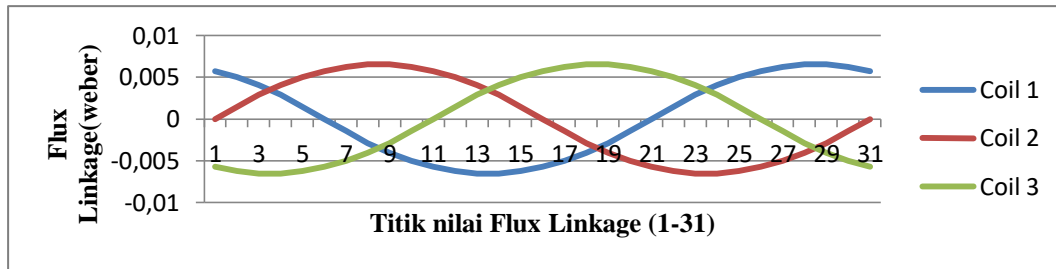
Gambar 11. *Flux linkage* dengan material stator Carpenter: Silicon steel



Gambar 12. *Flux linkage* dengan material stator Remko: Soft pure iron



Gambar 13. *Flux linkage* dengan material stator AISI silicon steel M-47 26 Ga



Gambar 14. *Flux linkage* dengan material stator ASTM Silicon Steel 64F 320

Pada gambar 10 sampai 14 menunjukkan hasil *flux linkage* koil dari beberapa variasi material stator *PMSG 12 slot 8 pole*. Pada grafik ini menggambarkan bahwa bahan material meliputi *TR52 USS transformer 52-29 gage*, *carpenter silicon steel*, *remko soft pure iron*, *AISI silicon steel M47-26 gage*, *ASTM silicon steel 64F-320* berpengaruh terhadap nilai *flux linkage* dari setiap titik nilai. Setiap titik nilai pada suatu material memiliki nilai interval yang dapat digambarkan dengan grafik. Pada grafik *flux linkage* menunjukkan bahwa fluks keluaran dari semua bahan material stator dirasa cukup baik dengan nilai dan grafik yang hampir sama, namun perbandingan grafik *flux linkage* secara detail terdapat perbedaan pada nilai di masing-masing titik dengan selisih perbedaan antar bahan material relatif kecil. Sesuai data yang didapat dari proses *solving* pada kumparan pertama serta sudut rotasi awal, nilai *flux linkage* tertinggi terdapat pada bahan material *AISI silicon steel M47-26 gage* dengan nilai *flux linkage* 0,005729011 weber. Nilai *flux linkage* terendah terdapat pada bahan material *TR52 USS transformer 52-29 gage* dengan nilai *flux linkage* 0,005670936 weber. Pada ketiga koil menunjukkan bahwa tegangan keluaran sebuah generator nantinya berupa 3 *phase*. Perbandingan keluaran grafik dari semua material hampir sama yaitu berbentuk sinus dalam artian aliran arus bolak-balik sesuai dengan karakteristik tegangan AC, sehingga jenis bahan material yang dilakukan uji *solving* ini sudah sesuai untuk disusun sebagai material stator pada sebuah generator.

### 3.3 Hasil Perhitungan Konstanta *Back EMF*

Grafik *flux linkage* pada dasarnya merupakan hasil konversi nilai *flux linkage* dalam data nilai yang didapat dari proses *solving* di *software MagNet Infolytica 7.5* yang tiap titik nilai mewakili sudut rotasi setiap 3° dengan titik awal sudut 0° sampai sudut 90°. Nilai data dari masing-masing titik grafik pada salah satu bahan material yaitu *TR52 USS transformer 52-29 gage* terdapat pada tabel 5. *Back EMF* bisa terjadi akibat adanya perubahan fluks magnet dalam suatu waktu tertentu. Besarnya *back EMF* dihitung dengan rumus persamaan sebagai berikut.

$$E_{coil} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} \quad (2)$$

Keterangan :

E coil : Tegangan pada masing-masing kumparan/koil



$\Delta\lambda$  : Perubahan *flux linkage* (Wb) atau  $\lambda_2 - \lambda_1$

$\Delta t$  : Rentang waktu 0,5ms = 0,0005 sekon

Rumus persamaan 2 di atas digunakan untuk mencari nilai tegangan seperempat bagian *PMSG* 12 slot 8 pole pada setiap koil. Nilai tegangan seperempat bagian yang sudah dihitung terdapat pada tabel 5.

Tabel 5. Nilai *flux linkage* dan tegangan 1/4 bagian

Sudut Rotasi	Bahan Material TR52: USS Transformer 52--29 Gage					
	Nilai Flux Linkage (Wb)			Nilai Tegangan 1/4 Bagian (V)		
	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 1	Coil 2	Coil 3
0	0,005670936	-0,0000000103	-0,005670921	-1,408865629	2,877116205	-0,968758467
3	0,004966503	0,001438548	-0,006155301	-1,888747456	2,826712781	-0,590880701
6	0,00402213	0,002851904	-0,006450741	-2,33974202	2,34030099	-0,000348662
9	0,002852259	0,004022055	-0,006450915	-2,8273892	1,888980992	0,59112976
12	0,001438564	0,004966545	-0,00615535	-2,877426111	1,405221832	0,972658799
15	-0,000000149	0,005669156	-0,005669021	-2,876794884	0,96873694	1,40836735
18	-0,001438546	0,006153525	-0,004964837	-2,826330516	0,591111751	1,88800851
21	-0,002851712	0,00644908	-0,004020833	-2,3385975	-0,00009254	2,338674459
24	-0,00402101	0,006449034	-0,002851496	-1,887974642	-0,591073135	2,82644504
27	-0,004964998	0,006153498	-0,001438273	-1,409305824	-0,967714883	2,876626044
30	-0,005669651	0,00566964	0,0000000398	-0,968355387	-1,408750755	2,87679368
33	-0,006153828	0,004965265	0,001438437	-0,591078789	-1,888047704	2,826426544
36	-0,006449368	0,004021241	0,00285165	0,000214751	-2,340052813	2,339787652
39	-0,00644926	0,002851215	0,004021544	0,590992538	-2,825903119	1,887632661
42	-0,006153764	0,001438263	0,00496536	0,968418514	-2,876283942	1,408607905
45	-0,005669555	0,000000121	0,005669664	1,408572291	-2,877244563	0,96850339
48	-0,004965269	-0,001438501	0,006153916	1,887725651	-2,825971514	0,590932855
51	-0,004021406	-0,002851487	0,006449382	2,339519876	-2,33978656	0,000195698
54	-0,002851646	-0,00402138	0,00644948	2,826417056	-1,888524261	-0,590356307
57	-0,001438437	-0,004965642	0,006154302	2,876979065	-1,409895767	-0,967499454
60	0,0000000521	-0,00567059	0,005670552	2,876949524	-0,967376183	-1,409984428
63	0,001438527	-0,006154278	0,00496556	2,826498797	-0,591331171	-1,887959976
66	0,002851776	-0,006449944	0,00402158	2,339974305	0,000120082	-2,340138793
69	<b>0,004021763</b>	<b>-0,006449884</b>	<b>0,002851511</b>	<b>1,887830968</b>	<b>0,591270882</b>	<b>-2,82629688</b>
72	0,004965679	-0,006154249	0,001438362	1,409896262	0,967383028	-2,876899747
75	0,005670627	-0,005670557	-0,000000087	0,967288957	1,409962314	-2,876842063
78	0,006154272	-0,004965576	-0,001438509	0,591263649	1,887950735	-2,826428387
81	0,006449903	-0,00402160	-0,002851723	-0,000050066	2,33993934	-2,339988526
84	0,006449928	-0,002851631	-0,004021717	-0,591370265	2,826436111	-1,887799657
87	0,006154243	-0,001438413	-0,004965617	-0,967411196	2,876902726	-1,4098864
90	0,005670538	0,0000000386	-0,00567056			

Pada prinsipnya setiap titik nilai flux linkage dihitung dengan rumus persamaan 2 untuk mendapatkan nilai tegangan seperempat bagian *PMSG* 12 slot 8 pole. Sebagai contohnya nilai

pada sudut rotasi 3° dan 0° koil 1 pada *flux linkage* digunakan untuk mengisi nilai tegangan 1/4 bagian koil 1 di sudut 0°, berikut mekanisme perhitungannya.

$$E_{coil} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{0,004966503 - 0,005670936}{0,0005} = -1,408865629 \text{ Volt}$$

Setelah tegangan seperempat bagian setiap koil didapatkan seperti tercantum pada tabel 5, selanjutnya mencari nilai tegangan satu bagian penuh dengan mengalikan semua nilai pada tegangan seperempat bagian setiap koil dan kemudian dilakukan perhitungan tegangan selisih antar koil dengan mekanisme sebagai berikut.

$$Koil_{1-2} = E_1 - E_2 \quad Koil_{2-3} = E_2 - E_3 \quad Koil_{3-1} = E_3 - E_1 \quad (3)$$

Keterangan :

$E_1$  : Tegangan pada koil 1

$E_2$  : Tegangan pada koil 2

$E_3$  : Tegangan pada koil 3

Nilai tegangan satu bagian penuh *PMSG 12 slot 8 pole* sendiri didapatkan hasil perhitungannya pada tabel 6. Rumus persamaan 3 di atas digunakan untuk mencari nilai tegangan selisih antar koil dan didapatkan hasil perhitungan pada tabel 6.

Tabel 6. Nilai tegangan 1 bagian dan tegangan selisih antar koil

Sudut Rotasi	Bahan Material TR52: USS Transformer 52--29 Gage					
	Nilai Tegangan 1 bagian (V)			Nilai tegangan Selisih antar koil (V)		
	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 1-2	Coil 2-3	Coil 3-1
0	-5,635462518	11,50846482	-3,875033869	-17,14392734	15,38349869	1,760428649
12	-7,554989824	11,30685112	-2,363522803	-18,86184095	13,67037393	5,191467021
24	-9,358968081	9,36120396	-0,001394646	-18,72017204	9,362598606	9,357573435
36	-11,3095568	7,555923967	2,36451904	-18,86548077	5,191404926	13,67407584
48	-11,50970444	5,620887326	3,890635198	-17,13059177	1,730252128	15,40033964
60	-11,50717953	3,874947762	5,633469399	-15,3821273	-1,758521637	17,14064893
72	-11,30532206	2,364447004	7,55203404	-13,66976907	-5,187587036	18,8573561
84	-9,354390001	-0,000370159	9,354697836	-9,354019842	-9,355067996	18,70908784
96	-7,551898569	-2,364292538	11,30578016	-5,18760603	-13,6700727	18,85767873
108	-5,637223297	-3,870859532	11,50650417	-1,766363765	-15,37736371	17,14372747
120	-3,873421548	-5,635003019	11,50717472	1,761581471	-17,14217774	15,38059627
132	-2,364315155	-7,552190816	11,30570618	5,187875661	-18,85789699	13,67002133

Sebagai contoh perhitungannya nilai tegangan 1/4 bagian pada koil 1 di sudut 0° di tabel 5 dikalikan empat agar didapatkan nilai tegangan 1 bagian untuk mengisi nilai koil 1 di sudut 0° pada tabel 6, berikut mekanisme perhitungannya.

$$\text{Nilai koil 1 (tegangan 1 bagian)} = -1,408865629 \times 4 = -5,635462518 \text{ Volt}$$

Nilai tegangan selisih antar koil didapat dari rumus persamaan 3 sebagai contoh perhitungannya yaitu selisih koil 1-2 pada tegangan 1 bagian di tabel 6 yang hasilnya untuk mengisi koil 1-2 pada tegangan selisih antar koil di tabel 6, berikut mekanisme perhitungannya.

$$\text{Nilai Koil 1-2} = -5,635462518 - 11,50846482 = -17,14392734 \text{ Volt}$$

Hasil tegangan selisih antar koil didapatkan dari persamaan 3, kemudian pada hasil tersebut dilakukan pencarian nilai mutlak maksimum antara koil 1,2,3 (nilai  $V_{DC}$ ) dari sudut  $0^\circ$  menuju  $360^\circ$  dengan jarak interval tiap  $12^\circ$  dan hasilnya terdapat pada tabel 7.

Tabel 7. Nilai mutlak maksimum (nilai  $V_{DC}$ )

<b>Bahan Material TR52: USS Transformer 52--29 Gage</b>			
<b>Sudut Rotasi</b>	<b>Nilai Mutlak maksimum (V)</b>	<b>Sudut Rotasi</b>	<b>Nilai Mutlak maksimum (V)</b>
0	17,1439	180	17,1433
12	18,8618	192	18,8548
24	18,7202	204	18,7172
36	18,8655	216	18,8598
48	17,1306	228	17,1475
60	17,1406	240	17,1477
72	18,8574	252	18,8578
84	18,7091	264	18,7205
96	18,8577	276	18,8565
108	17,1437	288	17,1472
120	17,1422	300	17,1472
132	18,8579	312	18,8575
144	18,7194	324	18,7197
156	18,8541	336	18,8569
168	17,1396	348	17,1472

Pada tabel 7 menunjukkan nilai mutlak maksimum dari masing-masing sudut rotasi. Pada Nilai  $V_{DC}$  atau nilai mutlak maksimum tersebut dicari nilai rata-ratanya dengan mekanisme perhitungan sebagai berikut.

$$\text{Nilai } V_{DC} \text{ rata-rata} = \frac{\text{Jumlah seluruh nilai VDC}}{\text{Banyak sudut rotasi}} = \frac{544,325}{30} = 18,14415 \text{ Volt}$$

Hasil nilai  $V_{DC}$  rata-rata semua bahan material yang didapatkan dari perhitungan tercantum pada tabel 8. Pada desain ini rotor dirotasikan tiap  $3^\circ$  per 0,5 ms atau 0,0005 s sehingga untuk rotasi mekanikal  $360^\circ$  mekanisme perhitungannya sebagai berikut..

$$\text{Periode (T) untuk rotasi mekanikal } 360^\circ = 0,0005 \times 120 = 0,06 \text{ s}$$

Perhitungan nilai frekuensi putaran menggunakan rumus persamaan 4 dan untuk hasil perhitungan nilai frekuensi pada semua bahan material stator tercantum pada tabel 8.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

Keterangan  $f$  : Frekuensi (Hz)

$T$  : Periode waktu rotasi mekanikal 360°

Berikut merupakan perhitungan nilai frekuensi putaran di semua material stator yang digunakan

$$\text{Nilai Frekuensi putaran } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,06} = 16,6667 \text{ Hz}$$

Tabel 8. Nilai VDC rata-rata pada semua bahan material

Material Stator	VDC Rata-rata (V)	Periode (s)	Frekuensi Putaran (Hz)
<i>TR52: USS Transformer 52--29 Gage</i>	18,14415	0,06	16,6667
<i>Carpenter: Silicon steel</i>	18,18087	0,06	16,6667
<i>Remko: Soft pure iron</i>	18,32697	0,06	16,6667
<i>AISI Silicon Steel M-47 26 Ga</i>	18,36894	0,06	16,6667
<i>ASTM Silicon Steel 64F 320</i>	18,32821	0,06	16,6667

Perhitungan nilai kecepatan angular yang dibutuhkan untuk merotasikan rotor menggunakan rumus persamaan sebagai berikut.

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

Keterangan  $\omega$  : Kecepatan angular (rad/s)

$f$  : Frekuensi (Hz)

Berikut perhitungan nilai kecepatan angular yang dibutuhkan untuk merotasikan rotor

- *TR52: USS Transformer 52--29 Gage*  
 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,6667 \text{ Rad/s}$
- *Carpenter: Silicon steel*  
 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,6667 \text{ Rad/s}$
- *Remko: Soft pure iron*  
 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,6667 \text{ Rad/s}$
- *AISI silicon steel M-47 26 Ga*  
 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,6667 \text{ Rad/s}$
- *ASTM Silicon Steel 64F 320*  
 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,6667 \text{ Rad/s}$

Konstanta *back EMF* atau disebut juga nilai  $K_e$  secara sederhana dapat mewakili kuat medan magnet (B), jumlah lilitan (I), dan jari-jari generator (R). Perhitungan nilai konstanta *back EMF* ( $K_e$ ) untuk desain generator menggunakan rumus persamaan sebagai berikut.

$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} \quad (6)$$

Keterangan :

$K_e$  : Nilai konstanta Back EMF (Vs/rad)

$\omega$  : Kecepatan angular (rad/s)

$V_{DC}$  : Nilai maksimum  $|E_1|$ ,  $|E_2|$ ,  $|E_3|$

Berikut merupakan perhitungan nilai konstanta *back EMF* atau nilai  $K_e$

- *TR52: USS Transformer 52--29 Gage*

$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} = \frac{18,14415}{104,6667} = 0,173351752 \text{ Vs/rad}$$

- *Carpenter: Silicon steel*

$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} = \frac{18,18087}{104,6667} = 0,173702637 \text{ Vs/rad}$$

- *Remko: Soft pure iron*

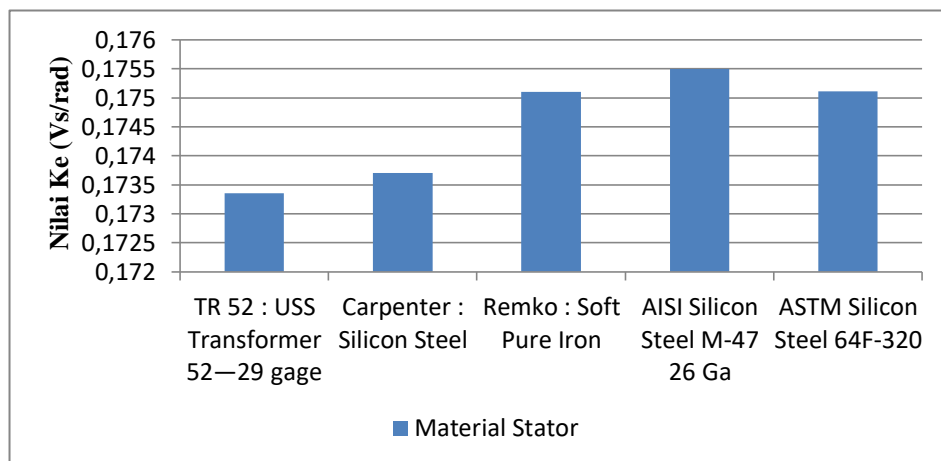
$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} = \frac{18,32697}{104,6667} = 0,175098487 \text{ Vs/rad}$$

- *AISI silicon steel M-47 26 Ga*

$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} = \frac{18,36894}{104,6667} = 0,175499505 \text{ Vs/rad}$$

- *ASTM Silicon Steel 64F 320*

$$K_e = \frac{V_{DC} \text{ Rata-rata}}{\omega} = \frac{18,32821}{104,6667} = 0,175110333 \text{ Vs/rad}$$



Gambar 15. Perbandingan nilai konstanta *back EMF* ( $K_e$ )

Pada gambar 15 menunjukkan hasil akhir berupa grafik perbandingan nilai konstanta *back EMF* ( $K_e$ ) dari beberapa bahan material stator *PMSG 12 slot 8 pole*. Pada hasil grafik ini menunjukkan bahwa semua bahan material hampir memiliki nilai konstanta *back EMF* ( $K_e$ ) sebesar 0,17 Vs/rad dengan nilai tertinggi terdapat pada bahan *AISI Silicon Steel M-47 26 Ga* dengan nilai sebesar 0,175499505 Vs/rad yang merupakan material dari bahan campuran baja dan silikon.

#### 4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator 12 Slot 8 Pole* dapat ditarik kesimpulan bahwa perancangan desain generator dibuat dengan desain 1/4

model sebab tampilan gelombang tegangan, pola fluks, dan nilai *flux linkage* pada *software* lebih ringkas dan efisien. Desain model berulang setiap 90° sehingga dengan simulasi 1/4 model konstruksi generator menjadi terdiri 3 slot kumparan dan 2 kutub magnet. Hasil uji *solving* menunjukkan bahwa 3 slot kumparan pada stator berpengaruh terhadap nilai *flux linkage* yang menghasilkan 3 grafik sebagai nilai tegangan fasa U-V-W. Magnet permanen yang terdiri dari 2 kutub berfungsi sebagai pemicu kumparan agar terjadi induksi elektromagnetik.

Pemodelan pada *software MagNet Infolytica 7.5* menggunakan parameter *source frequency* sebesar 60 Hz dan *setting system* kecepatan putar sebesar 1000 rpm. Hubungan antara jumlah kutub generator dengan frekuensi berdasarkan rumus persamaan menunjukkan bahwa konstruksi magnet pada pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator* sudah sesuai dengan jumlah kutub magnet sebanyak 8 kutub. Hasil pengujian perbandingan bahan material stator menunjukkan *remko soft pure iron* memiliki nilai permeabilitas tertinggi dengan nilai 0,00004 Wb/Am. Hasil pengujian perbandingan bahan material stator menunjukkan *AISI Silicon Steel M-47 26 Ga* memiliki nilai konstanta *back EMF* tertinggi dengan nilai 0,175499505 Vs/rad.

## PERSANTUNAN

Segala puji bagi Allah SWT atas nikmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Sholawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendoakan dan memberi dukungan penuh kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
2. Bang Ricky Elson dan segenap Tim LBN, karena berawal dari sana ide membuat tugas akhir ini tercipta.
3. Bapak Agus Supardi S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
4. Bapak dan ibu dosen prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah mengajarkan banyak ilmu dan memberi nasehat selama perkuliahan.
5. Teman-teman Mahasiswa angkatan 2017 prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.

## DAFTAR PUSTAKA

Herres, David. (2015). *Basics of Magnetic Permeability : Test and Measurement Tips*. <https://www.testandmeasurementtips.com/basics-of-magnetic-permeability/>.

- Koo, Min-Mo et al. (2015). *Characteristic Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Generator With Slotless Stator Structure Considering Magnetic / Mechanical Air Gap Using Semi-3-D Analytical Method*. IEEE Transactions on Magnetics. Vol.51, Issue.11.
- Liu, Pu., Barlow, Claire Y. (2017). *Wind Turbine Blade Waste in 2050*. ScienceDirect : Waste Management, Volume 62, Page 229-240.
- Menezes, Eduardo J.N., Araujo, A.M., & Bouchonneau da Silva, N.S. (2017). *A review on Wind Turbine Control and its Associated Methods*. ScienceDirect : Journal of Cleaner Production, Volume 174, Page 945-953.
- Putri, Ratna Ika et al. (2017). Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application. IET Electric Power Applications , Volume 12, Issue 4, Page 455-462.